

plaats te houden. De Zeeuws-Vlaamse kust is minder aan erosie onderhevig. Op enkele plaatsen groeien de duinen enigszins aan, zoals bij het Zwin en de Verdrongen Zwarte polder. De contrasterende, harde grenslijn van de zeedijk wordt hier vervangen door de brede, golvende, meer natuurlijke grenslijn van de duinen van Walcheren en Vlaanderen.

Literatuur

Huybrechts, W. & C. Verbruggen, 1994. Rivierlandschappen in Vlaanderen: geomorfologische ontwikkeling. *Landschap* 11/2: 3-13.

Kerrincks, H., C. Marius & A. Rambaut, 1995. Grensoverschrijdend krekengebied - Landschap, relict en typologie. Universiteit, Gent.

Moor, G. De & I. Heyse, 1978. De Morfologische evolutie van de Vlaamse Vallei. *De Aardrijkskunde* 4: 343-375.

Vos, P.C. & R.M. van Heeringen, 1997. The holocene geology and occupation history of the Province of Zeeland (SW Netherlands). *Mededelingen TNO*, 59.

Wilderom, M., 1973. Tussen Afsluitdammen en deltadijken, deel 4.

Summary

The landscape of the Scheldt

From prehistoric times the river Scheldt has changed its course from south-north to east-west. Relicts of the old river valley still exist, such as the meanders of Kalken and Berlare, the Brabant Wall and enumerable creeks in the polders of Zeeland. The effects of the rising sea level are quite remarkable, particularly in Flanders, where the highwater tide level has risen 2 m since 1800 and the rivers Durme and Rupel receive much more sediments nowadays. The building of dykes started in the 11th century lasted until quite recently. As the sea level rise will continue more activities can be expected for the safety of the inhabitants. This will have a further impact on the landscape of the Scheldt.

Prof.dr. M. Antrop
Vakgroep Geografie
Universiteit Gent
Krijgslaan 281 S8
B-9000 Gent
email: marc.antrop@rug.ac.be

Drs. P.J. van der Reest
Provincie Zeeland
Postbus 165
4330 AD Middelburg
email: pj.vd.reest@zeeland.nl

Stefan Van Damme & Patrick Meire

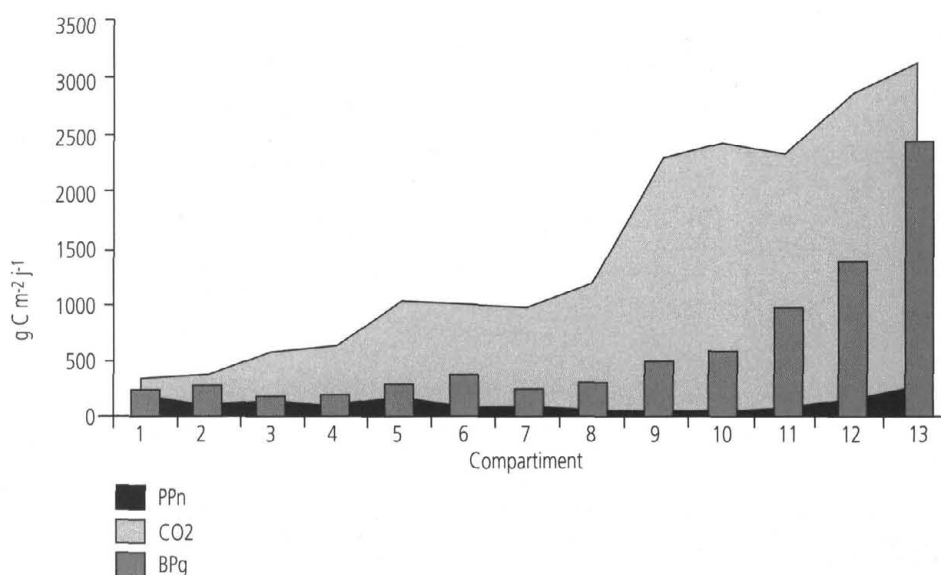
Het Schelde-estuarium als

Het stroomgebied van de Schelde en haar bijrivieren bestaat uit ongeveer 21.000 km² dichtbevolkt gebied met veel industrie en intensieve landbouw. De menselijke activiteit belast de waterlopen van het bekken met een grote hoeveelheid verontreinigende stoffen. De afvalstoffen die vanuit het bekken naar zee stromen passeren voor het grootste deel het estuarium. Daar blijken zowel de aard als de hoeveelheden van de bestanddelen van de vuilvracht te veranderen. Het estuarium oefent een filterfunctie uit. De zuurstofhuishouding in het estuarium bevindt zich ondanks een licht herstel nog steeds in een belabberde toestand, en de nutriëntenstroom naar zee zorgt voor een verminderde kwaliteit van de kustwateren (Billen, 1993; Van Damme et al., 1999).

Koolstof

Per jaar komt meer dan 200.000 ton organische koolstof in het estuarium terecht. Er zijn diverse bronnen van die koolstofvracht. Een deel ervan wordt rechtstreeks als CO₂ uit de atmosfeer gehaald via fotosynthese. Planktonbloei tijdens de lente en de zomer, vooral in de Boven Zeeschelde, levert een geschat aandeel op van 10 tot 60% (bij piekmomenten) van de vracht organische koolstof (Hellings et al., 1999). Een geringer deel (2 à 5 %, met uitschieters tot max. 10%) is afkomstig van oever- of schorvegetatie langs het estuarium. De rest is het menselijk aandeel. Tijdens de korte planktonpiek is ongeveer de

helft van de koolstof van menselijke oorsprong. De rest van het jaar loopt dit aandeel evenwel op tot 90%. Een ingrijpende menselijke invloed is bijgevolg onloochenbaar. Het verrassende aan het Schelde-estuarium is dat slechts een geringe, nauwelijks afbreekbare fractie van de enorme koolstofvracht de zee bereikt. Het estuarium laat zich hier zien als een gigantische bioreactor die het overgrote deel van de koolstofaanvoer binnen de eigen grenzen, vooral bacterieel, afbreekt. Het gevolg is uitstoot van CO₂ in geweldige proporties (fig. 1). Met fluxen naar de atmosfeer van 50 tot 350 ton koolstof per dag evenaart het



filter: een bioreactor van stofstromen

Schelde-estuarium de uitstoot van een zwaar industriegebied, en verovert het een plaats tussen de Europese records (Frankignoulle et al., 1998).

Stikstof

Bereikt koolstof nauwelijks de zee, nutriënten doen het wel. De stikstofvracht die door het estuarium naar zee schuift (51.000 ton gebaseerd op gegevens van begin jaren negentig (Soetaert & Herman, 1995), is dermate dat in de kustwateren drastische ongunstige verschuivingen in fytoplanktongemeenschappen optreden (Billen, 1993). Silicium is hierbij het sleutelement. In tegenstelling tot nutriënten neemt de concentratie van silicium, een element dat niet onderhevig is aan menselijke invloed, niet toe bij verhoogde aanvoer van afvalwater. Diatomeeën, ééncellige wieren en een belangrijke voedselbron voor zoöplankton en hogere trofische niveaus, hebben silicium nodig voor de aanmaak van hun uitwendig kiezel skelet. Niet-diatomeeën, zijnde vooral flagellaten, blauwwieren enz., kunnen het zonder silicium stellen. Zij komen vooral in het

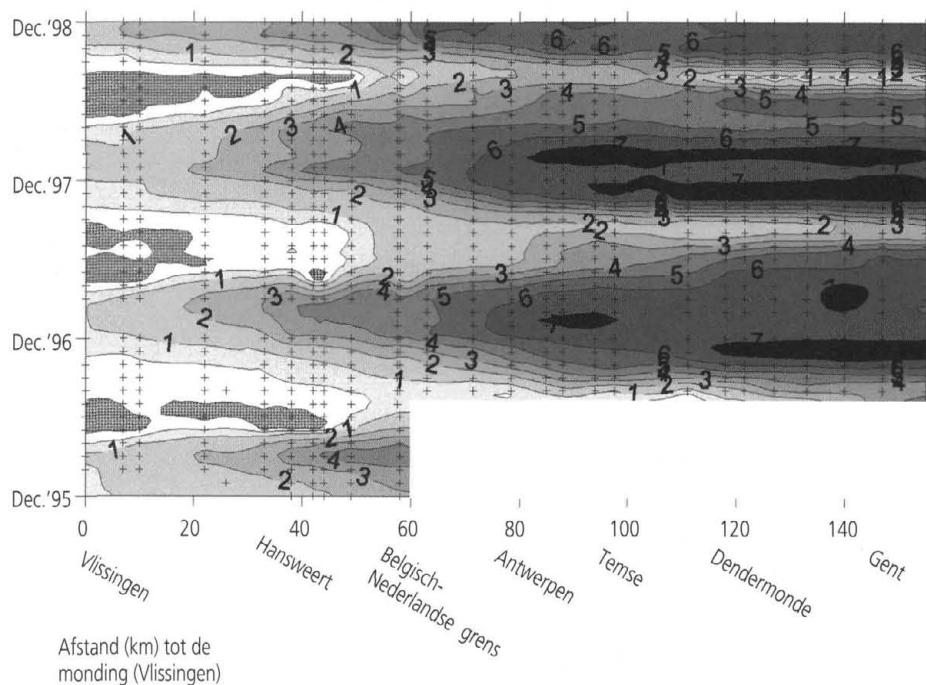


Fig. 2. Concentraties van opgelost silicium (mg Si/l) langs het Schelde-estuarium (naar Van Damme et al., 1999). Concentraties die limiterend zijn voor fytoplankton ($< 0,14$ mg Si/l) zijn gestippeld weergegeven.

microbieel voedselweb terecht. Als ze uiteindelijk afsterven zorgen ze voor hinderlijke neveneffecten van eutrofiëring, zoals daling van het zuurstofgehalte. Bovendien worden niet-diatomeeën minder goed opgenomen door hogere trofische niveaus, zoals vissen. In de kustwateren, en ook in de mondingzone van de Schelde, wordt de bloei van diatomeeën beperkt door gebrek aan silicium i.p.v. stikstof (fig. 2). Hierdoor neemt de dominantie van niet-diatomeeën toe, met alle gevolgen van dien.

Stikstof bereikt de Noordzee vooral als nitraat. Nochtans bestaat de input in het estuarium vooral uit ammonium. De omzetting van ammonium naar nitraat, nitrificatie, is het belangrijkste stikstofproces in het estuarium. Het zuurstofverbruik dat ermee gepaard gaat is niet te veronachtzamen naast het verbruik t.g.v. koolstofafbraak. Samen zijn ze bepalend voor de concentratieprofielen van zuurstof (fig. 3). Dit profiel vertoont minima in de zone rond de monding van de Rupel, waar de ongezuiverde vuilvracht van Brussel in de Schelde terecht komt. Pas in de Westerschelde worden de zuurstofcondities bevredigend door menging met zuiverder zeewater.

De evolutie van de waterkwaliteit heeft een ingrijpende werking op de filterfunctie. De aangehouden inspanning om steeds meer oppervlaktewater te zuiveren heeft zich vertaald in een reductie van de koolstofvracht. Een stijging van de zuurstofgehalten was het gevolg (fig. 4); de geurhinder van het anoxische water van vroeger is verdwenen. Nitrificatie kon hierdoor beter doorgaan. Met de jaren werd steeds meer ammonium omgezet tot nitraat (fig. 4). Maar de verbetering van de zuurstofhuishouding heeft een keerzijde. Denitrificatie, het enige proces dat stikstof, met name nitraat, definitief kan uitschakelen tot stikstofgas, en in veel mindere mate tot lachgas, kan pas doorgaan onder zeer zuurstofarme condities. Toename van zuurstof impliceert afname van denitrificatie. Het feit dat nitraat zich meer opstapelt lijkt erop te wijzen dat dit inderdaad gebeurt. De verwachting was

Fig. 1. Jaargemiddelde netto primaire productie (PPn), bruto bacteriële productie (BPg) en CO_2 -efflux (CO_2) langs het Schelde-estuarium (naar Van Damme et al., 1999).

Compartimentering:

- 1 = Vlissingen-Borsele,
 - 2 = Borsele-Terneuzen,
 - 3 = Terneuzen-Ossensisse,
 - 4 = Ossensisse-Hansweert,
 - 5 = Hansweert-Waarde,
 - 6 = Waarde-Kruispolderhaven,
 - 7 = Kruispolderhaven-Bath,
 - 8 = Bath-Belgisch-Nederlandse grens,
 - 9 = Belgisch-Nederlandse grens-Doel,
 - 10 = Doel-Kruisschans,
 - 11 = Kruisschans-St.-Anna,
 - 12 = St.-Anna-Hoboken,
 - 13 = Hoboken-Rupelmonding.
- Het zoetwaterdeel is niet volledig bestreken.
(Bron: PPn (Kromkamp & Peene, 1995);
BPg (Goosen et al., 1997);
 CO_2 (Frankignoulle et al., 1998))

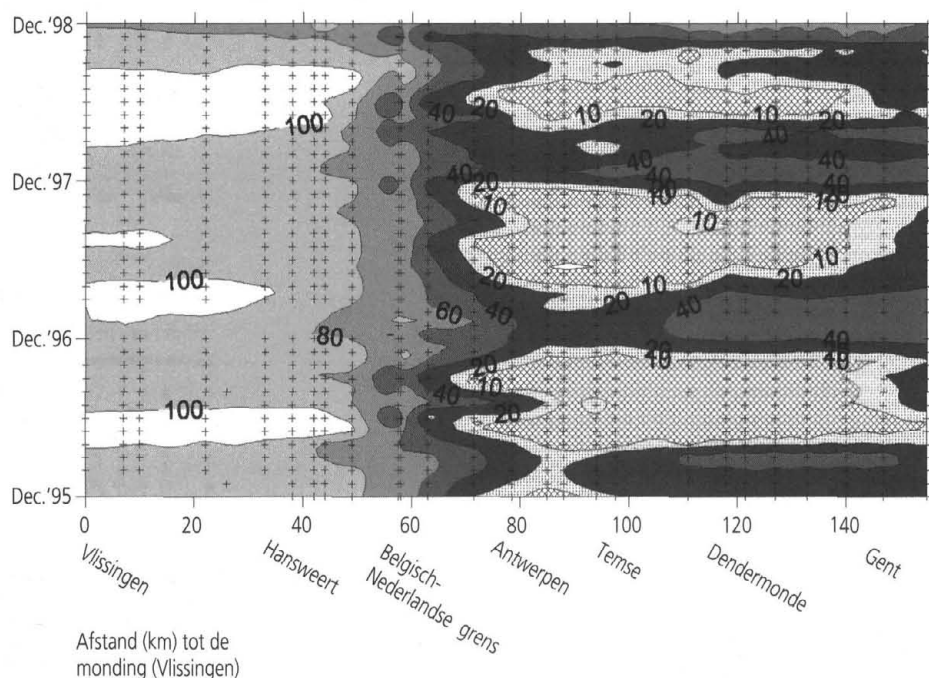


Fig. 3. Verzadiging van opgeloste zuurstof (%) langs het Schelde-estuarium (naar Van Damme et al., 1999).

dan ook dat meer stikstof de zee zou bereiken. Uit modellering bleek dit te kloppen. Het fenomeen kreeg bekendheid als 'de paradox van het Schelde-estuarium': zuiverder water (wat zuurstof betreft) en toch meer stikstof. Volledige klaarheid over deze ontwikkeling is er evenwel niet. Het gehalte aan totaal stikstof (zijnde alle componenten samen) vertoont ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens, het meest bemeten punt van het estuarium, een duidelijk dalende trend (fig. 4). Is stikstofverwijdering dan toch toegenomen? De afname van totaal stikstof kan deels te wijten zijn aan waterzuivering of aan de mogelijkheid dat denitrificatie zich in zuurstof-arme niches zoals in vlokken van zwevend stof kan handhaven. Het kan ook zijn dat door een toename van de tijinvloed meer verdund water ter hoogte van de grens doorgedrongen is.

In elk geval zou de verwijdering van stikstof uit het systeem veel groter kunnen zijn. Intergetijdengebieden vertonen, vooral in het zoete deel, hoge denitrificatiewaarden, maar hun areaal is zeer beperkt. De retentiecapaciteit van het

estuarium voor nutriënten is gering door het ingekrompen areaal aan intergetijdengebieden, maar ook door de beperkte verwerking in het open water. Immers, ondanks de enorme aanvoer van nutriënten is de productie van fytoplankton in heel het estuarium beperkt wegens lichtlimitatie. Zonder de hoge vracht aan zwevend stof zou stikstof meer in de (hogere) voedselketen opgenomen worden. De uiterst geringe aanwezigheid van filterfeeders (zoals mosselen) in het estuarium verhindert die doorstroming nog verder.

Fosfor

Fosfor vertoont in de Westerschelde en de Beneden Zeeschelde concentraties die 1 à 2 grootteordes hoger zijn dan de verwachte natuurlijke concentraties. De antropogene aanvoer van fosfor is, ondanks de dalende trend sinds de jaren zeventig, nog vrij hoog. In het meest stroomopwaartse deel van het estuarium zijn de concentraties van orthofosfaat het hoogst (fig. 5). Waar de zone van maximale turbiditeit (fig. 3 in Van Damme et al., op p. 38) bereikt wordt, nemen de concentraties drastisch af. In het zoete

deel van het estuarium heet fosfor gecontroleerd te zijn door fysicochemische processen. Het slaat neer en komt terug in oplossing naargelang de condities. De ophoping van fosfor in bodemsediment zou op zeker ogenblik aanleiding kunnen geven tot een massale vrijstelling. Fosfor wordt dan ook naast enkele zware metalen gerekend tot de elementen die aanleiding kunnen geven tot een chemische 'tijdbom' (Van Eck & De Rooij, 1993). In het zoute deel van het estuarium wordt fosfor eerder biologisch dan fysicochemisch gecontroleerd: het wordt hoofdzakelijk opgenomen door fytoplankton.

De toekomst

Het afvalwater van Brussel zal binnen afzienbare tijd gezuiverd worden. Dit zal de koolstofvracht die via de Rupel in het estuarium komt, gevoelig doen afnemen. De verwachting is dat de zuurstofhuishouding zich dan in zekere mate zal herstellen. De CO_2 -uitstoot zal parallel daarmee afnemen. Het eutrofiëringsprobleem in het estuarium zal afnemen. Wat er met de nutriënten gaat gebeuren is minder evident. Nitraat is een element dat via het grondwater en oppervlakkige afstroming in waterlopen opduikt en zo in belangrijke mate aan waterzuivering ontsnapt. De aanpak van het stikstofprobleem dient vooral te gebeuren door de aanleg van bufferstroken langs waterlopen in het bekken (Billen & Garnier, 1997). Wellicht zal de verbetering van de zuurstoftoestand de erfenis van het verleden vanuit de waterbodems doen opdruken door vrijstelling van voorheen neergeslagen stoffen.

Literatuur

- Billen, G., 1993. Coastal eutrophication in a global perspective. in: J.-J. Symoens, P. Devos, J. Rammeloo & Ch. Verstraeten (red.). Biological Indicators of Global Change. Symposium proceedings, Royal Academy of Overseas Sciences, Brussels: 17-34.
- Billen, G. & J. Garnier, 1997. The Pison River plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. Aquatic Microbial Ecology 13: 3-17.
- Damme, S. Van, T. Ysebaert, P. Meire & E. Van den Bergh, 1999. Habitatstructuren, waterkwaliteit en leefgemeenschappen in het Schelde-estuarium. Rapport IN 99/24, Instituut voor Natuurbehoud, Brussel.

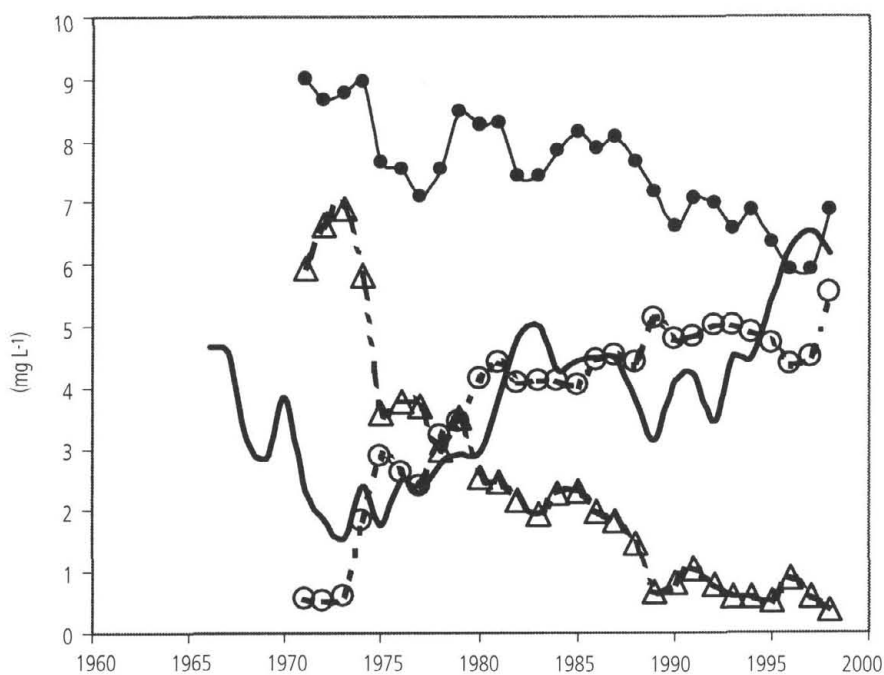
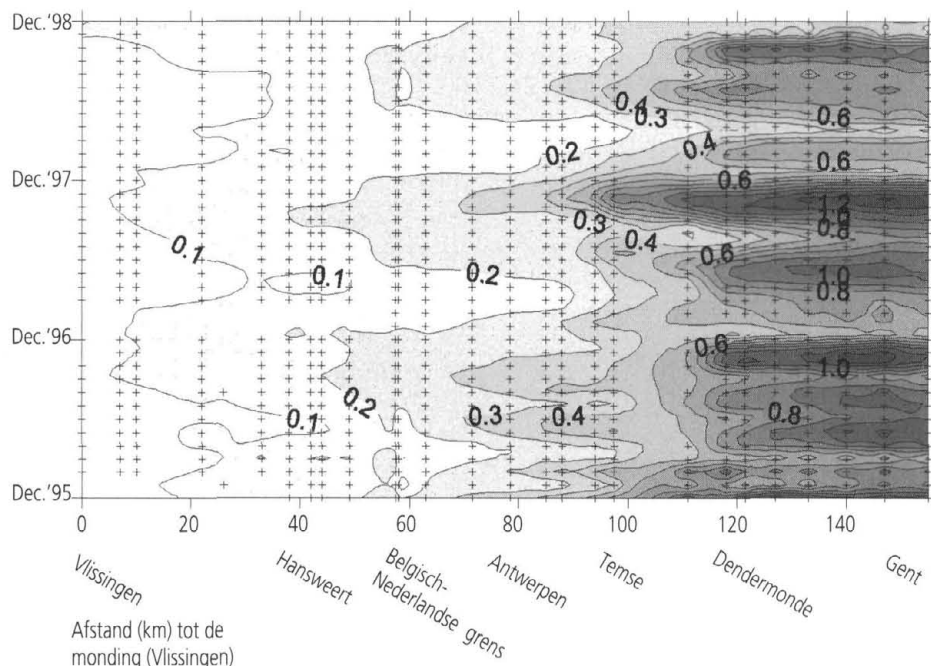


Fig. 4. Lange termijn trend (jaar-gemiddelden) van nitraat en nitriet (NO₃ NO₂) (mg N/l), ammonium (NH₄) (mg N/l), totaal stikstof (tot N) (mg N/l) en opgeloste zuurstof (O₂) (mg/l) te Schaar van Ouden Doel (Belgisch-Nederlandse grens) (naar Van Damme et al., 1999; data afkomstig van RIKZ, Middelburg, Nederland).

—○— NO₃NO₂
 —△— NH₄
 —●— Tot N
 — O₂

Fig. 5. Concentraties van fosfaat (mg P/l) in het Schelde-estuarium (naar Van Damme et al., 1999).



Eck, G.T.M. Van & N.M. De Rooij, 1993. Potential chemical time bombs in the Schelde estuary. Land degradation & rehabilitation 4: 317-332.

Frankignoulle, M., G. Abril, A. Borges, I. Bourge, C. Canon, B. Delille, E. Libert & J.-M. Theate, 1998. Carbon dioxide emission from European estuaries. Science 282: 434-436.

Goosen, N.K., P. van Rijswijk, J. Kromkamp & J. Peene, 1997. Regulation of annual variation in heterotrophic bacterial production in the Scheldt estuary (SW Netherlands). Aquatic Microbial Ecology 12: 223-232.

Hellings, L., F. Dehairs, M. Tackx, E. Keppens & W. Baeyens, 1999. Origin and fate of organic carbon in the freshwater part of the Scheldt estuary as traced by stable carbon isotope composition. Biogeochemistry 47: 167-186.

Kromkamp, J. & J. Peene, 1995. On the possibility of net phytoplankton primary production in the turbid Schelde estuary (SW Netherlands). Marine Ecology Progress Series 121: 249-259.

Soetaert, K. & P. Herman, 1995. Nitrogen dynamics in the Westerschelde estuary (SW Netherlands) estimated by means of the ecosystem model MOSES. Hydrobiologia 311: 225-246.

Summary

The filter function of the Scheldt estuary

The Scheldt estuary is exposed to large loads of carbon and nutrients. This leads to a eutrophication problem, characterized by reduced oxygen concentrations and a huge efflux of CO₂. In the coastal waters a degradation of the foodchain is noted, caused by excessive nutrient supply. The capacity of the estuary to polish the water is important, but cannot cope with the vast scale of the immissions. Restoration and development of tidal wetlands can contribute in several ways to restore the water quality. Increase of water treatment is expected to have positive ecological results. Nevertheless, restoration of the oxygen conditions might counteract some purifying processes.

Ir. S. Van Damme & prof.dr. P. Meire
 Universitaire Instelling Antwerpen (UIA),
 Departement Biologie,
 Onderzoeksgroep Ecosysteembeheer
 Universiteitsplein 1
 B-2610 Wilrijk
 email: svndamme@uia.ua.ac.be